

13.5 Emissionskennfelder

Bei der lufthygienischen und luftchemischen Bewertung der Auswirkungen von verkehrsverflüssigenden Maßnahmen sind Emissionskennfelder der relevanten Fahrzeugkategorien unerlässlich. Sie beschreiben den von der Fahrsituation abhängigen momentanen Emissionsausstoß und sind Grundlage für die Beschreibung des Abgasausstoßes im Münchener Straßennetz mit Hilfe eines Verkehrsflussmodells.

Für den Bereich der Pkws existierten bislang lediglich Emissionskennfelder für Nicht-Kat-Fahrzeuge sowie für EURO-1-Fahrzeuge. Da die EURO-1-Kennfelder das Emissionsverhalten von Fahrzeugen mit Abgasreinigungstechnologie auf dem Stand der späten achtziger Jahre widerspiegeln, kann mit den bisher vorhandenen Emissionskennfeldern allein keine adäquate Beschreibung des Abgasausstoßes der aktuellen Münchener Pkw-Zusammensetzung durchgeführt werden. Die vom Forschungszentrum Jülich durchgeführten Arbeiten dienten daher dem Ziel, erstmals für ein Kat-Fahrzeug (Ford Mondeo, D4-Norm) mit moderner Abgasreinigungstechnologie Emissionskennfelder für die gesetzlich reglementierten Substanzen CO, NO_x, Gesamt-HC sowie für CO₂ zu erstellen. Die Basis für die erstellten Emissionskennfelder bildete dabei ein zeitlich hochaufgelöster Datensatz, gewonnen aus on-board Messungen des Abgasausstoßes des Messfahrzeugs im realen Münchener Straßenverkehr. Die Repräsentativität der Abgasemissionen des verwendeten Fahrzeugs konnte anhand der gefundenen Emissionen für eine Stichprobe von 9 modernen Kat-Fahrzeugen am Rollenprüfstand des RWTÜV Essen nachgewiesen werden.

13.5.1 Aufbau und Evaluierung der on-board Abgasanalytik

Als Messfahrzeug wurde ein Ford Mondeo (Baujahr 2000, 85 kW, 3-Wege-Kat, D4-Abgasnorm) mit umfassender Abgasanalytik ausgerüstet [1]. Abb. 13-1 zeigt eine Prinzipskizze des experimentellen Aufbaus. Der Benzinverbrauch (PLU 401-108, Pierburg), die gefahrene Geschwindigkeit, der Lambda-Wert und das Signal des Luftmassensensors werden sekundlich vom Datenaufnahmesystem aufgezeichnet. Aus dem Abgasstrom wird ein Fluss von ca. 5 L/min angesaugt und analysiert. CO, NO und CO₂ werden mit kommerziell verfügbaren IR-Gasanalysatoren vermessen (URAS, ABB). Der NO- und NO₂-Gehalt des Abgases wird durch UV-Absorption nachgewiesen (LIMAS, ABB). Der Gesamt-HC-Menge wird durch ein FID System gemessen (FID, ABB). Zusätzlich werden niedrige Mischungsverhältnisse von CO durch einen umgebauten Spurengasanalysator (TE48, Thermo Instruments) nachgewiesen. Sekündliche Emissionswerte für CO, CO₂, NO, NO₂ und Gesamt-HC in g/s und in g/km werden aus den Mischungsverhältnissen unter Verwendung des Gesamtgasflusses (gemessen vom Luftmassensensor) berechnet. Zusätzlich wird die massenflussabhängige Zeitverschiebung zwischen Motorauslasszeitpunkt und Analysezeitpunkt korrigiert.

Das Abgas wird zusätzlich auf seine Kohlenwasserstoffzusammensetzung hin untersucht. Zu diesem Zweck werden zuvor evakuierte Edelstahlbehälter (Silcosteel, RESTEK) mit Abgasproben befüllt (Sammelzeit ca. 20 s) und später im Labor analysiert [2, 3, 4]. Dabei wird das Abgas in unterschiedlichem Ausmaß mit synthetischer Luft verdünnt, so dass die Verdünnung stets umgekehrt proportional zum Gesamtabgasstrom erfolgt (constant volume sampling, CVS). Der Vergleich des MOBINET on-board Analytik mit der Prüfstandsanalytik am Emissionsprüfstand des RWTÜV Essen lieferte gute Übereinstimmungen zwischen beiden Messverfahren. Für NO_x und HC wurden Abweichungen von deutlich unter 10% beobachtet; bei CO₂ und CO betrugen sie weniger als 3% [5].

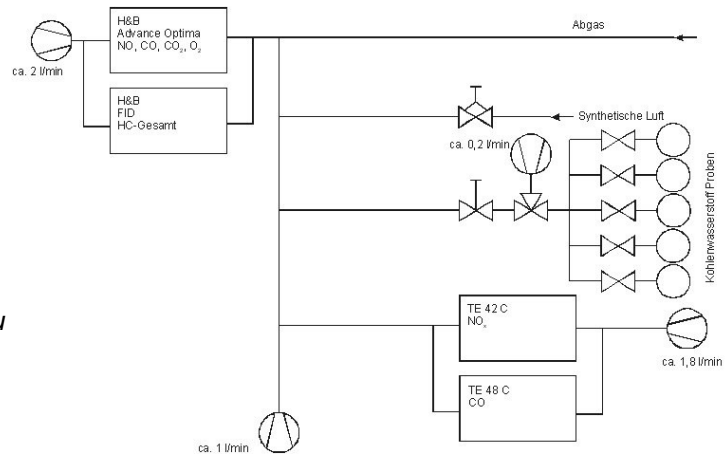


Abbildung 13-1: Schematischer Aufbau und Gaslaufplan für die im MOBINET-Fahrzeug verwendete Abgasanalytik.

13.5.2 Auswahl der Teststrecken in München

Zwischen Mai und Juli 2001 wurden mit dem MOBINET-Fahrzeug umfangreiche Emissionsmessungen im Münchener Straßenverkehr durchgeführt. Der so gewonnene Datensatz umfasst über 70.000 Sekundendaten von CO, CO₂, NO, NO₂, Gesamt-HC sowie der relevanten Fahrparameter (vgl. 13.5.1). In Abstimmung mit dem Arbeitsbereich wurden drei Fahrtstrecken ausgewählt. In Zusammenarbeit mit der BMW AG wurden die Fahrtrouten zu Dokumentationszwecken mit einem GPS-System aufgezeichnet (vgl. Arbeitsbericht 2/2001 [5]).

13.5.3 Entwicklung von geschwindigkeits- und leistungsabhängigen Emissionskennfeldern aus den Münchener on-board Messungen

Wie von Hassel et al. [6] gezeigt wurde, kann die momentane Abgasemission eines Pkws als Funktion der momentanen Geschwindigkeit v [km/h] und der momentan abgerufenen Leistung $v \cdot b$ [m^2/s^3] beschrieben werden. Aus dem in München gewonnenen Datensatz wurden die Kaltstart-Betriebsbedingungen entfernt, indem nur Daten mit mehr als 500 Sekunden Abstand zum Fahrtbeginn in die Kalkulation einbezogen wurden. Es wurden Emissionskennfelder und ihre Standardabweichungen über den gesamten auftretenden Geschwindigkeitsbereich (0 bis 125 km/h im Abstand von 10 km/h) und Leistungsbereich (–20 bis +20 im m^2/s^3 Abstand von 5 m^2/s^3) berechnet [7]. Die Emissionskennfelder wurden termingerecht im Frühjahr 2002 an den für die Bewertung mit dem Verkehrsflussmodell zuständigen Projektpartner BMW AG übergeben. Abb. 13-2 zeigt das Resultat für die Messgröße Gesamt-HC. Es wird deutlich, dass sich im mittleren Geschwindigkeitsbereich (30 bis 60 km/h) und für moderate Leistungsanforderungen (+5 bis +15 m^2/s^3) beträchtliche Emissionserniedrigungen erzielen lassen, so dass von der im Rahmen des MOBINET-Projekts angestrebte Verkehrsverflüssigung spürbare umweltentlastende Wirkungen erwartet werden können.

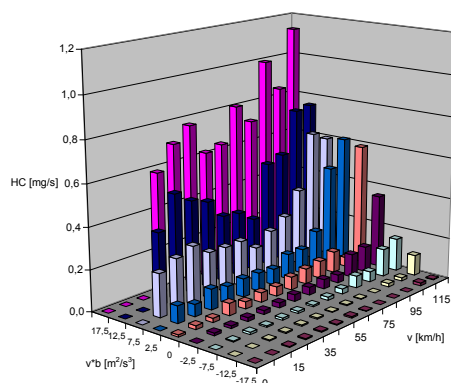


Abbildung 13-2: Gesamt-HC Emissionen [mg/s] des MOBINET Fahrzeugs basierend auf den Münchener on-board Messungen als Funktion der Geschwindigkeit v [km/h] und der abgerufenen Fahrzeugleistung $v \cdot b$ [m^2/s^3] (b : Beschleunigung).

Neben der Generierung aktueller Emissionskennfelder wurden aus den on-board Messungen für die limitierten Abgaskomponenten CO, NO_x und Gesamt-HC auch die Beiträge des Kaltstarts berechnet. Die Emissionen in den ersten 200 s nach einem Kaltstart (Kaltstartemissionen) wurden denen der MOBINET on-board Fahrt¹ (Dauer 1505 s, kein Kaltstartanteil) gegenübergestellt [8]. Die zusätzlichen Kaltstartemissionen betragen für NO_x 14% der während der MOBINET on-board Fahrt anfallenden Emissionen. Für CO liegt der Kaltstartanteil bei 67%, während der Kaltstartanteil bei den Gesamt-HC über 90% beträgt. Demzufolge ist die urbane Schadstoffbelastung in hohem Maß von Kaltstarts geprägt.

13.5.4 Entwicklung eines für München repräsentativen Prüfstandszyklus'

Ein weiteres Arbeitsziel bestand darin, aus den in München aufgezeichneten Fahrparametern einen repräsentativen Fahrzyklus für den Rollenprüfstand zu entwickeln, der das Fahrverhalten im Münchener Stadtverkehr widerspiegelt. Es konnte gezeigt werden, dass der entwickelte Zyklus den gleichen Häufigkeitsverteilungen bezüglich Geschwindigkeit, Beschleunigung und abgerufener Fahrzeugleistung genügt, wie sie für den Gesamtdatensatz gelten [7]. Abb. 13-3 beschreibt den Zeitverlauf des aus den Fahrparametern synthetisierten Prüfzyklus', nachfolgend als „MOBINET-Prüfstandszyklus“ bezeichnet.

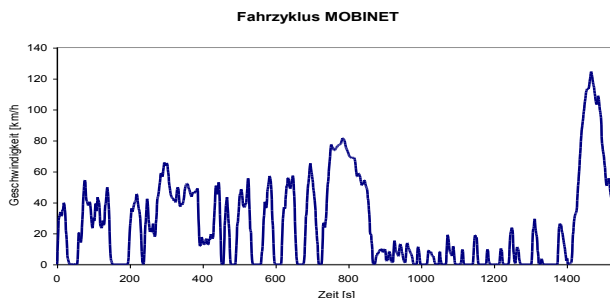


Abbildung 13-3: Geschwindigkeitsverlauf als Funktion der Zeit für den aus den gemessenen Fahrparametern in München synthetisierten MOBINET Prüfstandszyklus.

Der MOBINET-Prüfstandszyklus ist aus tatsächlich im Münchener Verkehr gemessenen Fahrparameteraufzeichnungen zusammengesetzt. Der erste Teil des Fahrzyklus' ist durch kurze Beschleunigungs-, Verzögerungs- und Haltephasen gekennzeichnet, wie sie typisch sind bei Stadtverkehr, der durch umfassende Signalanlagenregelung gesteuert wird. Im Anschluss daran folgt eine ca. 100 sekundliche Phase mit einer Maximalgeschwindigkeit von mehr als 70 km/h, die den höheren Geschwindigkeitsbereich abdeckt, wie er bei Fahrten auf dem Mittleren Ring auftrat. Der Bereich von 900 bis 1400 Sekunden deckt den erheblichen Anteil von Stop-and-Go-Verkehr im Münchener Straßenverkehr ab. Den Abschluss bildet ein Autobahnanteil mit einer Maximalgeschwindigkeit von 120 km/h, wie er von uns beim Befahren der A8 und A99 vorgefunden wurde.

13.5.5 Vergleich zwischen „real-world“ Emissionsverhalten und Emissionsverhalten am Prüfstand im MOBINET-Zyklus

Ein wichtiger Gegenstand der Untersuchungen lag in der Klärung der Frage, ob die Emissionen des Testfahrzeuges im Straßenverkehr durch einen geeigneten Prüfstandszyklus (MOBINET-Zyklus) adäquat beschrieben werden können, oder ob sich hierfür die aus dem gesamten Münchener Datensatz gewonnen Emissionsbasisfunktionen besser eignen. Zu diesem Zweck wurde das Emissionsverhalten des Testfahrzeuges in München während derjenigen Fahrtabschnitte, aus denen der MOBINET-Zyklus

¹ Zur Definition der MOBINET on-board Fahrt: Dauer und Fahrtverlauf entsprechen der des MOBINET Zyklusses (vgl. Abschnitt 13.5.4).

zusammengesetzt ist, mit dem Ergebnis der Emissionsberechnungen und der Messung im MOBINET-Zyklus am Prüfstand des RWTÜV in Essen verglichen².

In Abb. 13-4 sind der Kraftstoffverbrauch sowie die Emissionen von CO₂, CO, NO_x und Kohlenwasserstoffen (NMHC) im Straßenverkehr und am Prüfstand verglichen mit den Berechnungen aus den Emissionsbasisfunktionen (jeweils MOBINET-Fahrt). Spritverbrauch und CO₂-Emission stimmen stets gut überein [8]. Die Emissionen von CO, NO_x und NMHC am Prüfstand differieren deutlich von denen in München. Die Abweichungen betragen +455%, -79% bzw. +213%. Die berechneten Emissionen von CO, NO_x und NMHC liegen um 57%, 29% bzw. 21% unter den in München gemessenen Emissionen und stimmen mit den Emissionen im Straßenverkehr somit wesentlich besser überein als die Prüfstandsemissionen.

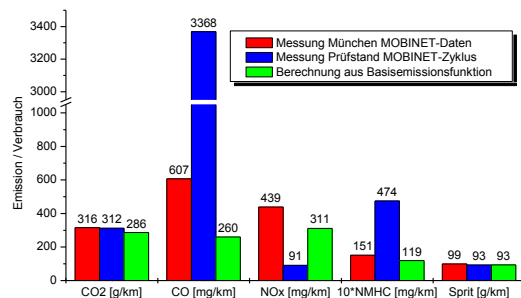


Abbildung 13-4: Kraftstoffverbrauch sowie Emissionen von CO₂, CO, NO_x und NMHC im Straßenverkehr und am Prüfstand im Vergleich mit den Berechnungen aus den Basisemissionsfunktionen (jeweils MOBINET-Fahrt).

Bei der detaillierten Analyse des Münchener Datensatzes zeigte sich, dass die Emissionen der limitierten Komponenten für positive $v \cdot b$ -Klassen gegenüber denen von CO₂ stark erhöhte Standardabweichungen aufweisen [8], die im Falle von CO bis zu einem Faktor zwei über den zugehörigen Mittelwerten liegen. Die Ursache für die starken Streuungen der limitierten Komponenten bei positiven Beschleunigungen ist klar benennbar: Anders als beim Nicht-Katalysatorfahrzeug ist der momentane Abgasausstoß eines modernen Katalysatorfahrzeugs nicht mehr eindeutig durch die Fahrparameter v und $v \cdot b$ zu beschreiben. Die bei den limitierten Komponenten gegenüber CO₂ stark erhöhten Streuungen um den Mittelwert machen deutlich, dass die Effizienz der Abgasnachbehandlung durch weitere Faktoren nachhaltig beeinflusst wird (z. B. Einschwingverhalten der Lambda-Regelung, vorherige „Beladung“ des Katalysators mit Sauerstoff bei Schubabschaltungen, Dauer der Beschleunigungsphasen)³. Andererseits konnte jedoch von uns gezeigt werden, dass die statistische Mittelung der Sekundendaten für Klassen von v und $v \cdot b$ (d. h. die Erstellung von Emissionsbasisfunktionen) zu einer effizienten Unterdrückung des Einflusses dieser Parameter führt. Auf diese Weise ist es möglich, durch Vorgabe der Sekundendaten von v und $v \cdot b$ mit Hilfe der gemittelten Emissionswerte aus den Emissionsbasisfunktionen das im Verkehr gemessene Emissionsverhalten in einer Qualität nachzumodellieren, dass die aufsummierten Emissionen einer Messfahrt (MOBINET-on-board-Fahrt) mit einem Fehler von durchschnittlich 30% beschrieben werden können. Allerdings ist darauf hinzuweisen, dass die Erstellung von Emissionsbasisfunktionen aus einem großen Ensemble unterschiedlicher Fahrtabläufe basieren muss, wie sie nur im realen Straßenverkehr auftreten.

² Zu Beginn dieser Untersuchungen beim RWTÜV in Essen wurde geprüft, ob das Messfahrzeug die Anforderungen im Zertifikationszyklus (NEFZ) für Fahrzeuge der Abgasnorm D4 erfüllt. Im NEFZ-Zyklus hat das Fahrzeug bei adäquater Berücksichtigung des Gesamtgewichts von 1700 kg folgende Emissionen produziert (Angaben der Grenzwerte in Klammern): CO: 335 mg/km / [700 mg/km]; NO_x: 61 mg/km / [70 mg/km]; HC: 83 mg/km / [80 mg/km].

³ Aus den Datensätzen der on-board-Messungen lassen sich Hinweise dafür finden, dass zumindest die obengenannten Einflussfaktoren ebenfalls auf den momentanen Abgasausstoß einwirken. Die Liste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

13.5.6 Emissionsspannbreiten aktueller 3-Wege-Kat Fahrzeuge mit D4-Norm

Drei verschiedene Pkw (Ford Mondeo, 85 kW, BJ 2000; VW Golf-4, 85 kW, BJ 2000, Ford Ka, 44 kW, BJ 2001) wurden an den Emissionsprüfständen des RWTÜV in jeweils 4 unterschiedlichen Prüfstandszyklen (Kaltstartzyklen NEFZ und FTP-75, Warmstartzyklen MOBINET und Autobahn) vermessen [9], um für ein Ensemble von Fahrzeugen mit gleicher Abgasnorm (D4) über einen weiten Geschwindigkeits- und Leistungsbereich die auftretenden Emissionsspannbreiten zu erfassen⁴ (vgl. Tabelle 13-1).

Substanz	Fahrzeug	NEFZ	FTP-75	MOBINET	Autobahn	Grenzwert D4
CO [mg/km]	VW Golf-4	200	740	500	470	700
	Ford Mondeo	430	890	3370	2890	
	Ford Ka	590	820	3100	13070	
NO _x [mg/km]	VW Golf-4	39	62	64	36	70
	Ford Mondeo	61	192	91	183	
	Ford Ka	71	62	83	131	
HC [mg/km]	VW Golf-4	19	42	4	7	80
	Ford Mondeo	83	76	47	75	
	Ford Ka	53	85	77	88	

Tabelle 13-1: Streckenbezogene Emissionen [mg/km] für verschiedene Prüfstandszyklen und Grenzwert für die D4-Norm (zu erfüllen im NEFZ).

Es ist festzustellen, dass alle drei Fahrzeuge im aktuellen Untersuchungszustand die D4 Zertifikationsnorm einhalten. Bei den anderen drei Prüfstandszyklen zeigen sich allerdings erhebliche Unterschiede im Emissionsverhalten [10]:

- Allein der Golf-4 konnte bei allen vier Prüfstandszyklen die Grenzwerte für HC, NO_x und für CO der D4-Norm erfüllen. Weder im MOBINET-Zyklus (städtischer Verkehr mit gegenüber dem NEFZ deutlich gesteigerten Leistungsanforderungen) noch im Autobahn-Zyklus wurden auffällige Anstiege der streckenbezogenen Emissionen beobachtet. Die größten Unterschiede in den streckenbezogenen Emissionen sind beim Golf-4 zwischen den beiden Kaltstartzyklen NEFZ und US-FTP-75 zu erkennen. Ursache für diesen Unterschied sind die im Kaltstart deutlich erhöhten Emissionen, die zum Teil beim NEFZ unberücksichtigt bleiben, beim US-FTP-75 aber voll zu Buche schlagen.
- Der NO_x-Grenzwert für die D4-Norm wird unter Autobahnbedingungen bei Geschwindigkeiten bis zu 160 km/h sowohl vom Mondeo als auch vom Ford Ka um einen Faktor 2 bis 3 überschritten.
- Für CO wurden für den Ford Ka und für den Mondeo unter betriebswarmen Bedingungen die höchsten Überschreitungen des D4-Grenzwertes gefunden. Im MOBINET-Zyklus überstiegen die CO-Emissionen des Mondeo die D4-Norm um den Faktor 5, im Autobahn-Zyklus lagen die streckenbezogenen Emissionen einen Faktor 4 über dem Grenzwert der D4-Norm. Die streckenbezogenen Emissionen des Ford Ka im Autobahn-Zyklus lagen nahezu um einen Faktor 20 über der D4-Norm, ein Wert, wie er eher für Nicht-Kat-Benziner typisch ist.

⁴ Eine umfassende Darstellung aller Prüfstandsresultate (Benziner, Diesel, Benzin-Direkteinspritzer) der im MOBINET-Projekt gemessenen Fahrzeuge findet sich bei Mittermaier et. al, 2003 [11].

Die durch die finanziellen Rahmenbedingungen vorgegebene Begrenzung der Stichprobe auf drei Fahrzeuge gleicher Abgasreinigungsnorm erlaubt nur eine überschlägige Bewertung des Repräsentativität des Emissionsverhaltens des MOBINET-Fahrzeugs. Dabei wurden keine Hinweise dafür gefunden, dass das MOBINET-Fahrzeug ein extremes Emissionsverhalten besitzt. Die aufgezeigten Emissionsverminderungspotentiale aufgrund von Verkehrsverflüssigungsmassnahmen (vgl. Abschnitt 13.5.3) sind somit grundsätzlich auf andere Fahrzeuge übertragbar.

Literatur:

- [1] Klemp, D., Mittermaier, B., Buers, H.J., Schmitz, Th. (2002) *Determination of Temporally Highly Resolved Passenger Car Emissions of Important Exhaust Components by Means of On-Board Measurements under Real Traffic Conditions*, VKM-THD Mitteilungen, **81**, 41 – 48.
- [2] Schmitz, Th. (2000), *Wissenschaftlicher Ergebnisbericht MOBINET 2/1999*, TÜV-Rheinland, Köln.
- [3] Schmitz, Th. (2001), *Wissenschaftlicher Ergebnisbericht MOBINET 2/2000*, TÜV-Rheinland, Köln.
- [4] Schmitz, Th., Hassel, D., Weber, F.J. (2000) *Determination of VOC Components in the Exhaust of Gasoline and Diesel Passenger Cars*, *Atmos. Environment*, **34** 2439 – 2447.
- [5] Schmitz, Th. (2001), *Wissenschaftlicher Ergebnisbericht MOBINET 1/2001*, TÜV-Rheinland, Köln.
- [6] Hassel, D., Jost, P., Weber, F.J., Dursbeck, F., Sonnborn, S., Plettau, D. (1994) *Abgasemissionsfaktoren von Pkw in der Bundesrepublik Deutschland – Abgasemissionen von Fahrzeugen der Baujahre 1986 bis 1990*, UBA Forschungsbericht 104 05 102 und 104 105 109 des TÜV Rheinland Berichte 8/94, Erich Schmitt Verlag Berlin.
- [7] Klemp, D. und Mittermaier, B., *Wissenschaftlicher Ergebnisbericht MOBINET 2/2001*, TÜV-Rheinland, Köln.
- [8] Klemp, D. und Mittermaier, B., *Wissenschaftlicher Ergebnisbericht MOBINET 1/2002*, TÜV-Rheinland, Köln.
- [9] Mittermaier, B. und Klemp, D., *Wissenschaftlicher Ergebnisbericht MOBINET 2/2002*, TÜV-Rheinland, Köln.
- [10] Mittermaier, B. und Klemp, D., *Wissenschaftlicher Ergebnisbericht MOBINET 1/2003*, TÜV-Rheinland, Köln.
- [11] Mittermaier, B., Klemp, D., Buers, H.J. (2003) *Regulated and Unregulated Exhaust Emissions from Nine Passenger Cars*, *Actes Inrets*, **92**, 183 – 190.